

УДК 621.365.2

Панкратов А. И., Бакан В. А.

ОЦЕНКА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

На производство стали с помощью дуговых сталеплавильных печей (ДСП) тратится около 60 % электроэнергии, производимой в мире. Поэтому исследование качественных и количественных показателей технологических процессов, связанных с разработкой энергоэффективных систем регулирования мощности ДСП является актуальным.

При работе ДСП наиболее энергозатратным является период расплава шихты.

Этот период характеризуется нестабильностью горения дуг, связанной с прогоранием каналов горения, оплавлением и падением кусков шихты, электродинамическим взаимодействием подвижных токоведущих элементов печи и дуг с ударными токами при коротких замыканиях (к. з.). Исследованиями [1, 2] установлено, что эксплуатационные к. з. вызывают колебания гибких кабелей и других подвижных элементов короткой сети, а это приводит к возникновению внешних возмущений в каналах управления регуляторов мощности.

Из-за отсутствия полной адаптивности к возмущениям существующие токовые, дифференциальные и импедансные регуляторы мощности реагируют на эти возмущения, что приводит к увеличению времени периода расплава, перерасходу электроэнергии [3].

Изменения электрических параметров в силовых и цепях управления ДСП в период расплава имеют случайный характер, в связи с чем для разработки адаптивных регуляторов мощности необходимо оценить частотные характеристики флуктуаций этих параметров.

Ряд исследователей, например, Montanari G. C., Loggini M., Cavallini A., Varadan S., Makrwn E. B., Girgis A. A., Collantes R., Gomez T., на основе случайного характера изменения нагрузки применяли стохастические модели для описания работы дуговых электропечей [4–6].

На основе установленных признаков хаоса в флуктуациях токов дуг ДСП для описания нестационарного характера нагрузки O'Neill-Carrillo E., Heydt G., Kostelich E. J., Jang G., Wang W., Heydt G. T. использовали теорию детерминированного хаоса [7–9].

Корреляционные связи между токами дуг и мощностью ДСП исследовались Лозинским О. Ю., Усачевым М. В. и др. [10, 11]. Оценка частотных характеристик флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей в период расплава шихты в этих работах не проводилась.

Целью работы является оценка частотных характеристик флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей в период расплава шихты.

Экспериментальными исследованиями изменений действующих значений токов трех фаз $I_1(t)$, $I_2(t)$, $I_3(t)$ и напряжений $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$ в силовых цепях и длин дуг $L_1(t)$, $L_2(t)$, $L_3(t)$ электросталеплавильных печей переменного тока ДСП-12, ДСП-50 ЗАО «НКМЗ» установлено, что все процессы имеют случайный характер и подчиняются вероятностному закону Гаусса, функции плотности распределения которых описываются уравнением:

$$f_i(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2ps_i^2}} e^{-\frac{(x_i - m_i)^2}{2s_i^2}}, \quad (1)$$

где m_i – математические ожидания случайных параметров; s_i^2 – дисперсии i -х параметров.

На рис. 1–3 в качестве примера приведены графики реализаций длительностями 100 с случайных процессов $I_1(t)$, $U_1(t)$, $L_1(t)$ одной из фаз ДСП-50 в период расплава.

Общие длительности реализаций составляли не менее 1300 с, шаг дискретизации $dt = 1$ с.

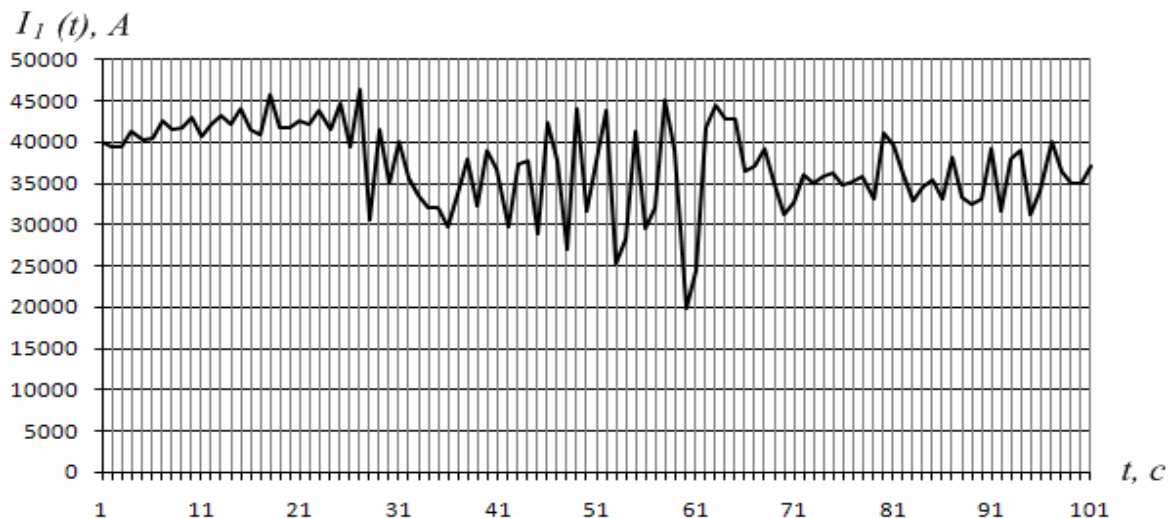


Рис. 1. График изменения тока дуги $I_1(t)$ фазы A

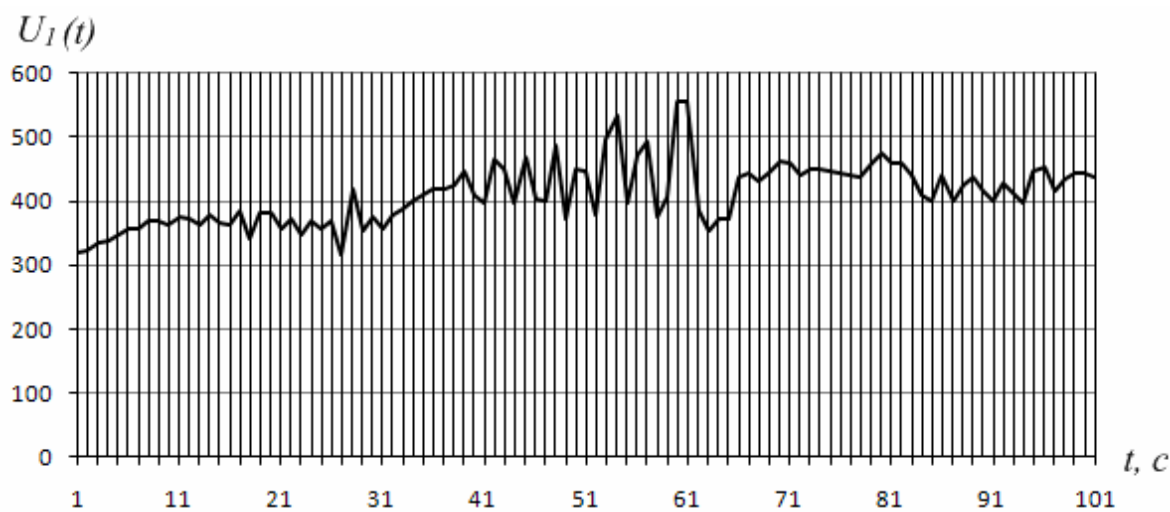


Рис. 2. График изменения напряжения дуги $U_1(t)$ фазы A

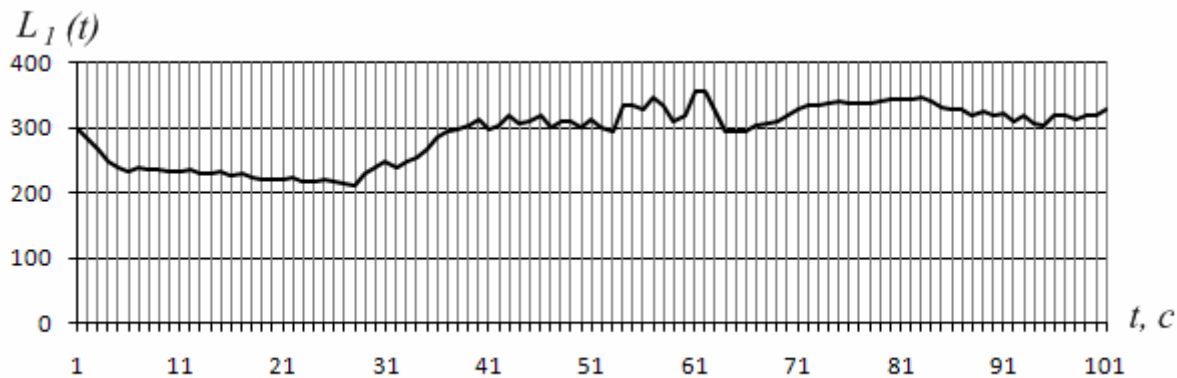


Рис. 3. График изменения длины дуги $L_1(t)$ фазы A

На графиках рис. 1–3 видно, что случайные процессы изменений токов, напряжений и длин дуг ДСП на первый взгляд не имеют периодических составляющих и имеют признаки хаоса. Для разработки систем компенсации колебаний электрических параметров ДСП необходимо установить периодичность флуктуаций этих параметров, получить количественные оценки их частотных характеристик.

Оценка частотных характеристик флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей в период расплава шихты производилась на основе автокорреляционного анализа.

Автокорреляционные функции $R_i(t)$ случайных процессов $I_i(t)$, $U_i(t)$, $L_i(t)$ трех фаз определялись по формуле:

$$R_i(\tau) = \int F_i(t)F_i(t-\tau)dt, \tag{2}$$

где t – текущее время; τ – смещение времени; F_i – исследуемые функции.

Графики автокорреляционных функций получены определением зависимостей математических ожиданий коэффициентов корреляций $R_i(t)$ базовых функций и значений этих же функций, но сдвинутых на время.

Достаточно важным для разработки систем регулирования мощности ДСП является оценка стационарности и эргодичности параметров случайных процессов, которые определялась по условиям:

$$m(x_i)M[x_i(t)] = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} x_i(t)dt, \tag{3}$$

где $m(x_i)$ – математические ожидания; T_i – принятые интервалы времени.

На рис. 4–6 приведены графики нормированных автокорреляционных функций $R_I(\tau)$, $R_U(\tau)$, $R_L(\tau)$ исследуемых процессов $I_i(t)$, $U_i(t)$, $L_i(t)$ одной из фаз.

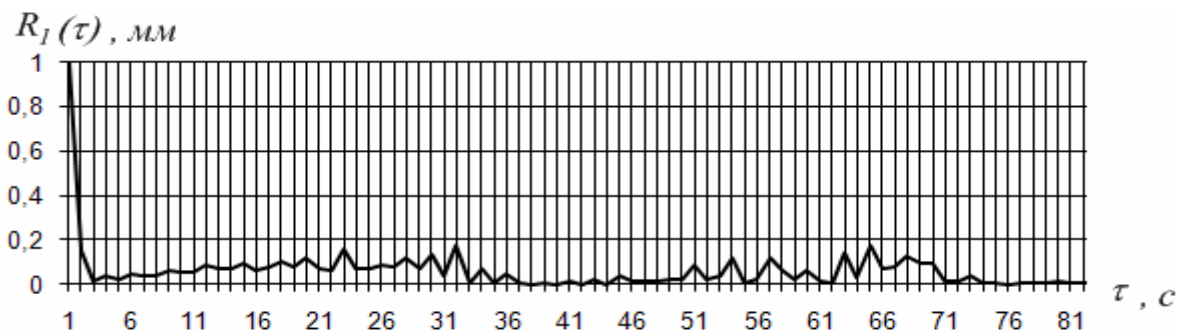


Рис. 4. График автокорреляционной функции $R_I(\tau)$ случайного процесса $I_i(t)$

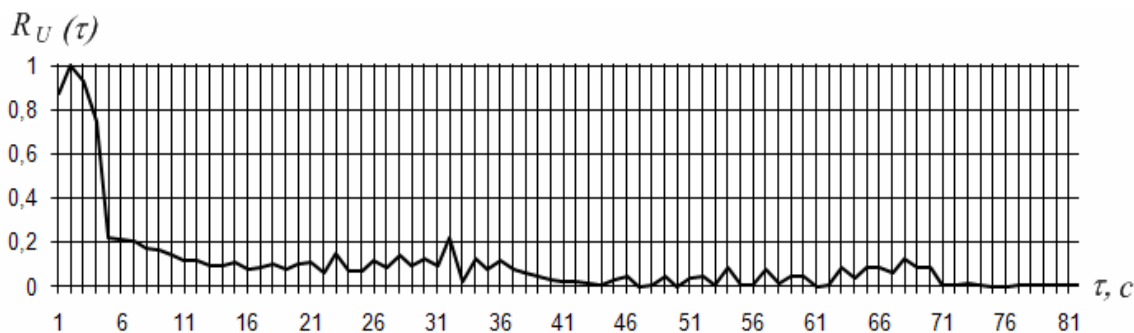


Рис. 5. График автокорреляционной функции $R_U(\tau)$ случайного процесса $U_i(t)$

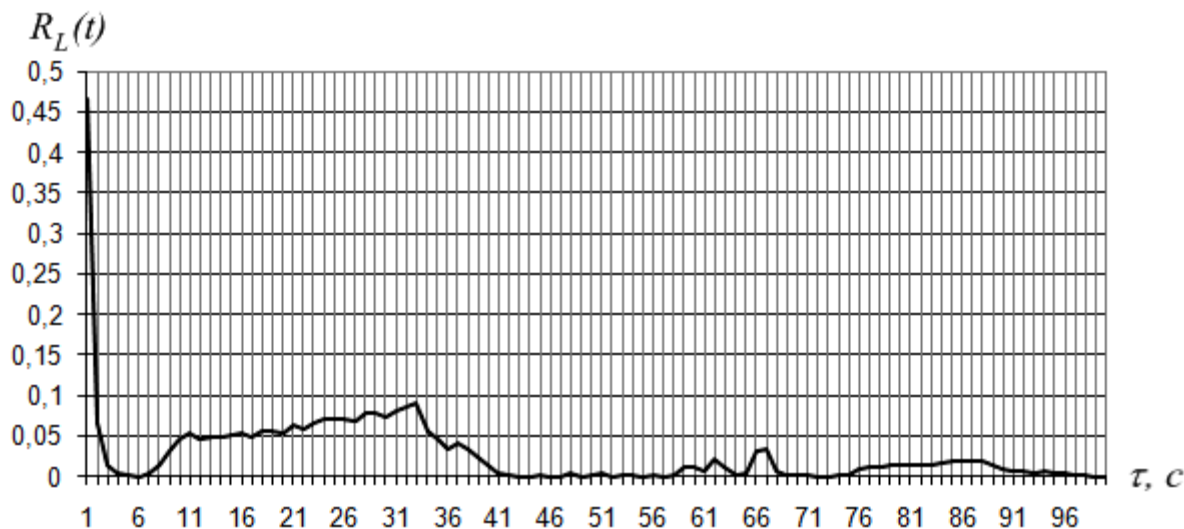


Рис. 6. График автокорреляционной функции $R_L(\tau)$ случайного процесса $L_i(t)$

Экспериментально полученные графики автокорреляционных функций наиболее точно аппроксимируются выражением:

$$R_i(\tau) = \sigma_i^2 e^{-\lambda_i \tau} \cos \omega \tau, \tag{4}$$

где λ_i – параметры функций; ω_i – угловые частоты периодических функций.

Графики автокорреляционных функций $R_i(\tau)$ случайных процессов $I_i(t)$, $U_i(t)$, $L_i(t)$ показали (рис. 4–6), что они являются стационарными по отношению к автокорреляционным функциям и обладают свойством эргодичности.

Эргодичность случайных процессов подтвердилась выполнением условий:

$$\tau \rightarrow \infty, R_i(\tau) \rightarrow 0. \tag{5}$$

Наличие периодических составляющих $\cos \omega_i t$ в автокорреляционных функциях свидетельствует о строгой периодичности случайных процессов. При этом частоты случайных колебаний около соответствующих математических ожиданий параметров ДСП совпадают с собственными инфранизкими частотами колебаний подвижных элементов короткой сети ДСП [1], определяемых по формуле:

$$\omega_{ci} = \sqrt{\frac{c_i}{m_i}}, \tag{6}$$

где c_i – жесткости стальных пружин (сердечников кабелей); m_i – массы кабельных проводников с изоляцией и шлангами с водой.

На графике $R_L(\tau)$ присутствуют высшие гармоники (рис. 6), которые модулированы нелинейными сопротивлениями дуг.

Частоты собственных колебаний подвижных элементов коротких сетей ДСП12, ДСП50, ДСП100 находятся в пределах:

$$f_{ci} = \frac{\omega_{ci}}{2\pi} \approx 0,15 \dots 0,6 \text{ Гц.}$$

В этих же интервалах находятся и частоты случайных периодических колебаний токов, напряжений и длин дуг, определенных автокорреляционным анализом:

$$f_{ci} = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{T_U} = \frac{1}{T_L} \approx 0,3 \dots 0,5 \text{ Гц},$$

где T_I , T_U , T_L – периоды колебаний токов, напряжений, длин дуг на графиках автокорреляционных функций (рис. 4–6).

Это указывает на связь параметров случайных модулированных колебаний электрических параметров ДСП с электромеханическими свойствами подвижных элементов короткой сети.

ВЫВОДЫ

На основе автокорреляционного анализа случайных процессов изменения токов, напряжений и длин дуг в период расплава ДСП выявлены эргодичности этих процессов и строгие периодичности флуктуаций токов, напряжений и длин дуг.

Установлено, что интервалы частот флуктуаций электрических параметров ДСП совпадают с интервалами собственных частот колебаний подвижных элементов короткой сети.

Полученные частотные характеристики флуктуаций электрических параметров дуговых сталеплавильных печей дают возможность разработать энергоэффективные регуляторы мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панкратов А. И. Исследование электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Сб. научных трудов ДонГТУ : наукові праці Донецького національного технічного університету, 2009. – Вып. 9 (158). – С. 179–185. – (Серия «Електротехніка і енергетика»).
2. Панкратов А. И. Оценка электромеханических возмущений в силовых цепях дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Кременчугского Национального технического университета. – Вып. 3, Ч. 1. – Кременчуг, 2009. – С. 231–234.
3. Панкратов А. И. Оценка адаптивности регуляторов мощности дуговых сталеплавильных печей к внешним возмущениям / А. И. Панкратов, А. В. Афанасьева // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2010. – Вып. 28. – С. 462–467. – (Серия «Электротехника, электроника и электропривод»).
4. Montanar G. C., Loggin M., Cavallin A. e. a. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – V. 8, № 4. – P. 2026–2036.
5. Varadan S., Makrwn E. B., Girgis A. A. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – V. 1, № 3. – P. 1685–1691.
6. Collantes R., Gomez T. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – V. 12, № 4. – P. 1812–1817.
7. O'Neill-Carrillo E., Heydt G., Kostelich E. J. e. a. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – V. 14, № 2. – P. 537–542.
8. Jang G., Wang W., Heydt G. T. e. a. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – V. 29, № 11. – P. 1060–1073.
9. Acha E., Semlyen A., Rajakovich N. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1990. – V. 5, № 3. – P. 1390–1395.
10. Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах : монографія / Костинюк Л. Д., Лозинський А. О., Лозинський О. Ю. та ін.; за ред. О. Ю. Лозинського. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2004. – 382 с.
11. Усачев М. В. Выбор параметра для оптимизации электрического режима дуговых печей переменного тока / М. В. Усачев, Б. Н. Парсункин, С. Н. Андреев // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях : сб. научн. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2009. – Вып. 4. – С. 188–191.